

学校编码: 10384  
学号: 19820081153006

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

# 4H-SiC 紫外光电探测器光电特性随温度变化的研究

Optical and electrical properties of 4H-SiC UV  
photodetector at various temperatures

郑云哲

指导教师姓名: 吴正云 教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011 年 5 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ）1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ）2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

## 摘要

随着空间科学的发展,航空航天及太空环境监测等领域要求光电探测器能够在较宽的温度范围内保持良好的性能,然而半导体器件的性能受温度的影响很大,因此研究光电探测器的光电特性随温度变化特点,尤其是低温下的变化特点具有重要的理论和实际意义。用 4H-SiC 制备的紫外光电探测器在室温下表现出优良的紫外探测性能,本文介绍了在 300-60 K 温度范围内,4H-SiC 紫外光电探测器的暗电流和相对光谱响应随温度的变化特性。

将被测探测器置于由液氮制冷的闭循环冷却系统,调节温度从 300 K 逐渐降低到 60 K。当探测器温度恢复到室温时,被测探测器未出现损坏,仍能够正常工作。

实验观察到随着温度的降低,探测器的暗电流和相对光谱响应都逐渐减小。温度从 300 K 降低到 60 K 时,被测探测器相对光谱响应的谱形发生了改变,不同波长入射光产生的光电流随温度降低而减小的速率有所不同,相对于短波长入射光的相对光谱响应,中长波长的入射光产生的相对光谱响应受温度影响较大。另外,被测探测器的响应波长范围略有缩小。

本文从两方面对相对光谱响应的温度特性进行了探讨,一方面从 p-i-n 结构紫外光电探测器光谱响应的理论计算出发,发现少子扩散系数,表面复合速度和界面复合速度的温度特性,都能够引起被测探测器光谱响应的改变,但考虑到被测探测器的结构参数,并结合理论计算,这些因素对相对光谱响应强度的影响都是有限的。

另一方面从 4H-SiC 材料本身特点,如材料缺陷,能带结构等方面出发,研究影响器件光电转换效率的因素。随着温度的降低,半导体材料缺陷陷阱对光生电子空穴对束缚几率的增加和声子数量的减少,都可以引起被测探测器相对光谱响应强度的减弱。而 4H-SiC 吸收系数随温度降低而减小,使更多的高能量光子深入到空间电荷区被吸收,并在强电场作用下形成光电流,因此,短波长部分的相对光谱响应表现为受温度的影响不大。

另外,4H-SiC 材料的能带结构随温度降低发生改变,由直接跃迁吸收产生的激子的产生几率有可能增加,可能是导致相对光谱响应短波长部分的光谱曲线

---

向长波长方向移动的原因；而 4H-SiC 禁带宽度随温度降低而变宽，使相对光谱响应减弱的同时，使长波长部分的光谱曲线向短波长方向移动。因此，被测探测器的响应波长范围略有缩小。

**关键词：**4H-SiC；p-i-n 紫外光电探测器；温度特性；光电特性

厦门大学博硕士论文摘要库

---

## ABSTRACT

With the development of the space science, aerospace and outer space environmental monitoring necessitate photodetector with high-performance in a wide operation temperature range. The performance of photodetectors is highly influenced by temperature. Therefore, it has an important theoretical and practical significance in search for temperature dependence of the photoelectric conversion mechanism of photodetectors. This paper describes the dark current and relative spectral response of 4H-SiC ultraviolet p-i-n photodetector, which showed excellent performance at room temperature, in the temperature range from 300K to 60K.

The device was located in the closed cycle cryogenic refrigerator, which was cooled by liquid helium. After returning to room temperature, the device appeared in reasonable condition, with no signs of deterioration.

The dark current and relative spectral response of the device decreased, as the temperature decreased from 300 K to 60 K. The decreasing extent of relative spectral responsivity at middle and long wavelength was larger than that of others. A little narrowing of the response wavelength range was observed as the temperature decreased.

First, this paper attempted to make an explanation in view of theoretical calculation of spectral response of the device. It was found that diffusion coefficient of minority carrier, surface recombination velocity and the interface recombination velocity could have effect on the spectral response of the device as the temperature decreased. However, considering the structural parameters of the device, they could not be the main influence on the spectral response of the device on the basis of theoretical calculation.

Then, taking the intrinsic properties of 4H-SiC into account, we developed models, which involved phonon contribution to optical absorption, the defects traps and hot excitons models, to explain all the experimental results. The observed relative spectral response temperature dependency of the device could be explained as follows.

---

The photon-absorption occurred at longer wavelength was due to indirect band transitions. And there were less phonon at lower temperature, which could reduce the probability of indirect transition. In addition, as the temperature decreased from room temperature, more electron-hole pairs were trapped by defects in SiC material. As a result, the relative spectral response at whole response wavelength of the device became reducing. Due to the smaller absorption coefficient of 4H-SiC at lower temperature, more high-energy photons diffused in the space-charge region, which would still enhance the relative spectral response, so the defects traps effect at low wavelength would be compensated. Consequently, the relative spectral response of the device at shorter wavelength looked relatively independent of temperature, while that at longer wavelength exhibited distinctly weakened behavior.

The energy band structure of SiC varied with the temperature. More excitons, which were created upon absorption of photons with higher energy, might formed as the temperature decreasing. Higher production probability of excitons might be the reason for the responsivity curve at shorter wavelength shifted to longer wavelength. While the band gap broadening effects caused the responsivity curve at longer wavelength to effectively shift to shorter wavelength.

**Keywords:** 4H-SiC; p-i-n UV photodetector; temperature dependence; optical and electrical properties

# 目 录

<b>第一章 绪论</b>	1
§ 1.1 半导体紫外光电探测器概述	1
§ 1.2 p-i-n结构紫外光电探测器的发展现状	2
§ 1.3 紫外探测器的光电特性随温度变化的研究现状	5
参考文献	7
<b>第二章 半导体材料的基本性质</b>	9
§2.1 碳化硅(SiC)材料性质	9
§2.1.1 碳化硅(SiC)材料的结构	9
§2.1.2 碳化硅(SiC)材料的基本性质	10
§2.1.3 碳化硅(SiC)材料的生长与缺陷	12
§2.2 半导体材料电学性质参数	13
§2.2.1 载流子浓度与温度的关系	13
§2.2.2 迁移率与温度的关系	14
§2.2.3 电阻率和温度的关系	16
§2.3 半导体材料光学性质参数	17
§2.3.1 禁带宽度与温度的关系	17
§2.3.2 吸收系数与温度的关系	18
参考文献	20
<b>第三章 p-i-n结构紫外光电探测器的基本原理和特性参数</b>	21
§3.1 p-i-n结构紫外光电探测器的工作原理	21
§3.2 光电探测器的主要性能参数	24
§3.2.1 暗电流	24
§3.2.2 光谱响应	25
§3.2.3 光电探测器的其他重要参数	26
参考文献	28
<b>第四章 低温系统的描述</b>	29



§4.1 低温的获得.....	29
§4.2 闭循环低温冷却系统.....	30
§4.3 低温测量方法.....	32
参考文献.....	35
<b>第五章 p-i-n结构 4H-SiC紫外光电探测器光电特性随温度变化的测试.....</b>	<b>36</b>
§5.1 测试系统简介.....	36
§5.1.1 测试仪器.....	36
§5.1.2 被测探测器特征.....	39
§5.2 器件暗电流的温度特性.....	39
§5.2.1 暗电流的测试.....	40
§5.2.2 暗电流测试结果与分析.....	41
§5.3 相对光谱响应的温度特性.....	42
§5.3.1 相对光谱响应的测试.....	43
§5.3.2 相对光谱响应测试结果与分析.....	44
§5.4 本章小结.....	58
参考文献.....	60
<b>第六章 工作总结与展望 .....</b>	<b>62</b>
<b>附录 硕士期间发表论文 .....</b>	<b>64</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>65</b>

---

## CONTENT

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
§1.1 An Overview of Ultraviolet(UV) Photodetector .....	1
§ 1.2 Research Progress of p-i-n UV Photodetector .....	3
§ 1.3 Research Progress of Temperature Dependence of UV Photodetector ..	5
References .....	7
<b>Chapter 2 Basic Properties of Semiconductor Material .....</b>	<b>9</b>
§2.1 4H-SiC Material Properties .....	9
§2.1.1 Structural Properties.....	9
§2.1.2 Basic Properties .....	10
§2.1.3 Defects .....	12
§2.2 Electrical Properties of Semiconductor Material.....	13
§2.2.1 Carrier Concentration and Temperatures .....	13
§2.2.2 Mobility and Temperatures .....	14
§2.2.3 Electrical Resistivity and Temperatures.....	16
§2.3 Optical Properties of Semiconductor Material .....	17
§2.3.1 Band Gap and Temperatures .....	17
§2.3.2 Absorption Coefficient and Temperatures .....	18
References .....	20
<b>Chapter 3 Fundamentals and Characteristics of p-i-n UV</b>	
<b>Photodetector.....</b>	<b>21</b>
§3.1 Fundamentals of p-i-n UV Photodetector .....	21
§3.2 Characteristics of Photodetector .....	24
§3.2.1 Dark Current .....	24
§3.2.2 Spectral Response .....	25
§3.2.3 Other Characteristics of Photodetector .....	26
References .....	28

---

<b>Chapter 4 Cryogenic technology .....</b>	<b>29</b>
§4.1 The obtaining of the Low Temperature .....	29
§4.2 Fundamentals of the Closed Cycle Cryogenic Refrigerator .....	30
§4.3 Methods for Measuring Low Temperature .....	32
References .....	35
<b>Chapter 5 Test and Measurement of 4H-SiC UV Photodetector at</b>	
<b>Various Temperatures .....</b>	<b>36</b>
§5.1 Introduction of Measurement System .....	36
§5.1.1 Measurement System .....	36
§5.1.2 Characteristics of the Experimental Sample .....	39
§5.2 Temperatures Dependence of the Dark Current .....	39
§5.2.1 Measurement of Dark Current .....	40
§5.2.2 Conclusion and Analysis of Dark Current .....	41
§5.3 Temperatures Dependence of Relative Spectral Response. ....	
.....	42
§5.3.1 Measurement of the Relative Spectral Response .....	43
§5.3.2 Conclusion and Analysis of Relative Spectral Response .....	44
§5.4 Summary .....	58
References .....	60
<b>Chapter 6 Summary and Future Work .....</b>	<b>62</b>
<b>Appendix .....</b>	<b>64</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>65</b>

# 第一章 绪论

紫外光电探测器主要用于 400 nm 以下波段紫外线的探测, 是将紫外光信号转换为电信号的器件。在光电检测系统中, 它的高灵敏度、低噪声可以准确地恢复并再现光源发出的信息。与红外、可见光波段探测相比, 紫外光电探测器具有三个主要优点<sup>[1]</sup>: (1) 对可见及红外波段是“可见盲”或“日盲”, 这样可以防止太阳光及其它可见光、红外光等自然光源的干扰; (2) 可在室温下工作, 无需制冷, 不必如红外光电探测器那样必须在液氮(77 K)甚至在液氦环境(4.2 K)下工作; (3) 结构简单、响应速度快、可靠性高、体积小等。

同红外辐射相比, 遥远星空传来的等紫外线信号都是比较微弱的, 这就要求紫外信号探测器必须具有高灵敏度、低噪声的特点, 以检测极其微弱的紫外信号。早期紫外探测多采用光电倍增管(PMT)和紫外增强型硅探测器<sup>[2,3]</sup>。与笨重、易损坏且成本较高的光电倍增管相比, 半导体光电探测器具有体积小、结构简单、可以在室温下工作、易于制备焦平面阵列、成本低等优点。

本章首先介绍用制备紫外光电探测器的材料及其结构特点, 然后介绍了 p-i-n 结构紫外光电探测器的研究现状, 以及光电探测器温度特性的研究现状。

## § 1.1 半导体紫外光电探测器概述

由于近年来宽带隙半导体材料生长技术的突破, 世界各国都开始采用宽带隙的第三代半导体材料(主要是 GaN 基材料、SiC 和金刚石)来制备具有紫外敏感的光电探测器, 这三种宽带隙半导体材料都是研制紫外光电探测器的理想材料, 又各具特点:

金刚石膜价格低, 但目前还很难实现 n 型材料, 因而限制了其应用<sup>[4]</sup>, 而 GaN 和 SiC 是目前材料生长和外延技术比较成熟的两种紫外光电探测器材料。GaN 作为直接带隙半导体材料, 不仅在高温, 大功率, 发光器件应用方面有其独特的优势, 而且作为探测器可以实现窄的响应波长和较高的光谱响应<sup>[5]</sup>。SiC 材料是间接带隙半导体材料, 不适合于发光器件的制备, 然而, 在紫外光电探测器方面, 目前却更具优势。

首先, 目前 SiC 材料的生长质量要比 GaN 高, GaN 材料的缺陷密度约为  $10^6 \sim 10^8$

$/\text{cm}^3$ ，而SiC材料的缺陷密度约在  $10^3 \sim 10^4 /\text{cm}^3$ 之间<sup>[6]</sup>，因此，采用SiC材料理论上可以制备更大面积的探测器，且器件产出率更高，更有利于商业化生产；其次，GaN目前尚无衬底，SiC有自己的衬底Si，并且可以在SiC表面高温直接可以生长出高质量的 $\text{SiO}_2$ 层<sup>[7]</sup>，作为钝化层，而且SiC器件的制备工艺较GaN成熟，制备难度相对较低；与GaN相比，采用SiC材料制备的光电探测器具有更宽的紫外波段响应；另外，由于SiC材料生长过程的固有特性，它本身具有相当于超晶格的结构，其电子和空穴的离化率之比小于 0.1<sup>[8]</sup>，而GaN以及其它III—V族材料的电子和空穴离化率之比约为 1，如采用空穴作为初始雪崩制备的SiC雪崩光电探测器将具有较小的过剩噪声因子。因而，碳化硅(SiC)作为紫外光电探测器制备的理想半导体材料，近年来越来越受到世界各国的广泛关注。

目前，紫外光电探测器的主要结构有光电导、肖特基(Schottky)、金属—半导体—金属(MSM)、p-i-n结构和雪崩结构(APD)等类型<sup>[1,9]</sup>，如图 1-1 所示<sup>[1]</sup>。采用平面结构和同轴结构的光电导探测器，与传统光电导器件相比，缩短了相应时间；肖特基结构器件响应速度较快，噪声小；MSM结构光电探测器适合于难于掺杂的半导体材料，尤其适合做阵列探测器，并且同电子器件的制造工艺完全相容。p-i-n结构光电探测器由于i层的存在，有源层宽度增加，具有量子效率较高，响应速度较快，暗电流较低等优点。而APD结构因其具有内部增益，具有灵敏度高，增益带宽大和响应速度快而备受人们关注，主要应用于微弱信号和单光子信号的检测。

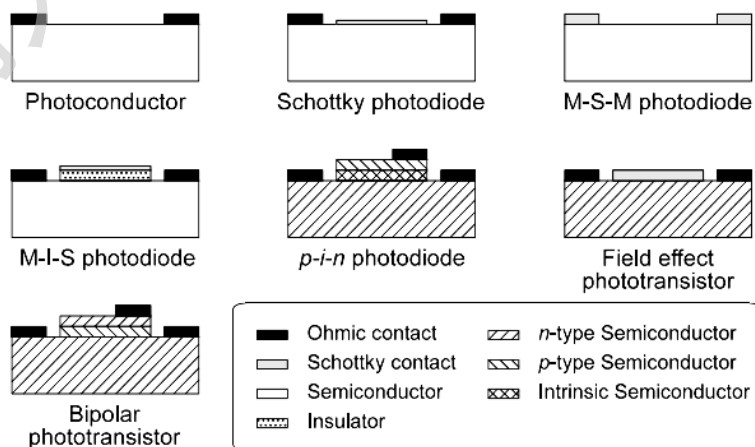


图 1-1 不同类型半导体光电探测器示意图

## § 1.2 p-i-n 结构紫外光电探测器的发展现状

GaN 和 SiC 作为目前发展较为成熟两种光电探测器材料，用其制备的 p-i-n 结构的光电探测器取得了丰硕成果。

J.M.Van Hove等人于 1997 年报道了采用MBE技术做成的GaN同质p-i-n结构探测器，在 360 nm处峰值响应度为 0.11 A/W，响应时间为 8.2  $\mu\text{s}$ <sup>[10]</sup>。M.Razeghi等人于 1998 年也报道了类似的结果，采用低压MOCVD技术做成了p-i-n结构的探测器，器件的响应度为 0.15 A/W，响应时间为 2.5  $\mu\text{s}$ <sup>[11]</sup>。2001 年，Peter Sandvik等人制备出p-i-n结构AlGaIn日盲型紫外光电探测器，其响应峰值波长在 227-364 nm之间可调。2002 年，APA光学公司向市场推出商品化的GaN基紫外光电探测器，并借助于他们在GaN基FET器件领域的领先技术，进而开发出PD/FET混合器件，以用于工作温度高达 200-300  $^{\circ}\text{C}$ 的火焰传感器<sup>[12-14]</sup>。目前，GaN基p-i-n和MSM结构光电探测器的响应度、带宽以及信噪比等指标已适合用于通信和成像要求。

国内关于p-i-n结构GaN基探测器的研究相对滞后，2009 年，重庆光电技术研究所也成功研制了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 日盲型紫外探测器及其焦平面阵列探测器，如图所示 1-2，像元数为  $320 \times 256$ ，光谱响应范围为 260~280 nm，峰值波长的响应度大于 95 mA/W，-0.5 V偏压时暗电流小于 1.2 pA，台面直径为 300  $\mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>。

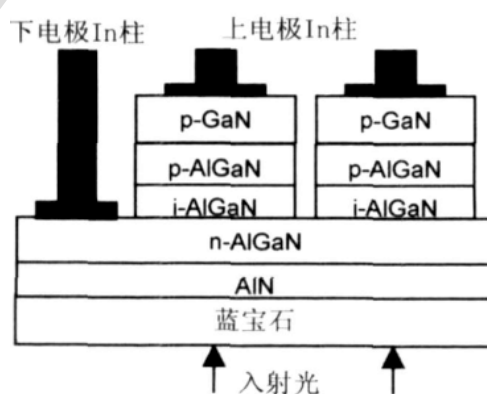


图 1-2  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  紫外探测器阵列结构简图

2011 年，中国科学院半导体所制备p-i-n结构的GaN基可见光盲紫外探测器，如图所示 1-3。器件的响应波长范围为 225~255 nm，零偏压下测得的暗电流为

27 pA，光电流为 2.7 nA，峰值响应度为 23 mA/W，并在此基础上制备出大面积太阳盲紫外探测器芯片，其像元数为  $128 \times 128$ ，光敏元直径为  $44 \mu\text{m}$ ，像元间距为  $50 \mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>。

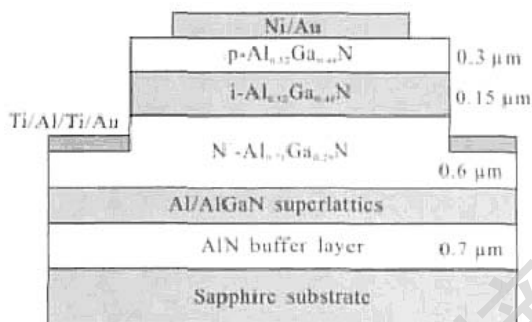


图 1-3 p-i-n 型背入射太阳盲紫外探测器剖面图

关于 p-i-n 结构 SiC 紫外探测器的研制，John T. Torvik 等人<sup>[17]</sup>于 1999 年报道了采用 6H-SiC 制备的 p-i-n 结构紫外探测器，所报道器件的漏电流约在 pA 数量级，光谱响应范围位于 200~400 nm 波段，在 276.5 nm 波长处的峰值相应度为 0.15 A/W，对应的量子效率为 82%。

2006 年，F. Yan 等人在一篇关于 SiC 探测器的综述文章中提到大面积 p-i-n 结构 4H-SiC 紫外光电二极管的制备，器件的面积大小为  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ ，该管具有较低的暗电流 ( $\sim 10^{-14} \text{ A}$ )，且在 290 nm 波长处的量子效率为 78%，对应峰值探测率估计接近  $10^{16} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ <sup>[18]</sup>。

虽然国际上已经做了许多关于 SiC 器件基础方面的研究工作，国内在这方面的研究相对滞后，中科院半导体所 X. F. Liu 等人报道了垂直结构 4H-SiC p-i-n<sup>[19]</sup>和  $p^+ - \pi - n^- - n^+$ <sup>[20]</sup> 紫外光电探测器，如图 1-4 所示。 $p^+ - \pi - n^- - n^+$  紫外光电探测器光敏面积为  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  时。室温下，反向偏压为 0-20 V，响应峰值波长在 280-310 nm，10 V 反向偏压下，紫外可见抑制比超过两个数量级。

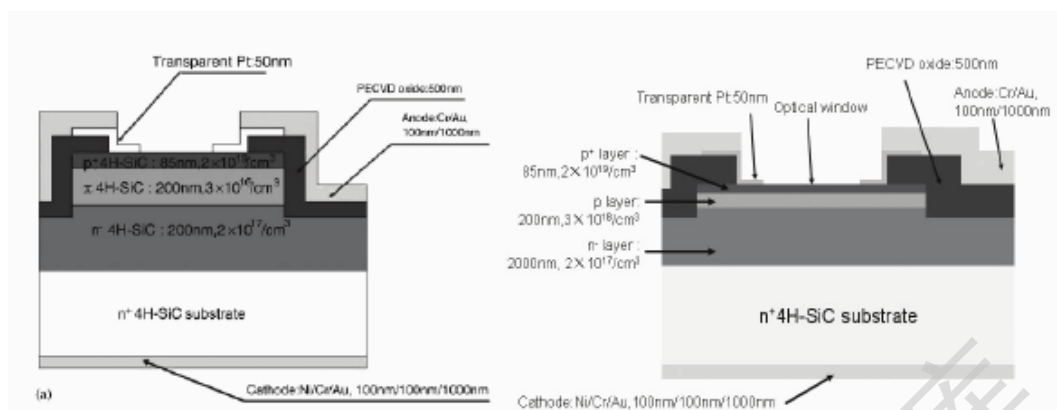


图 1-4 X.F.Liu 等人 06-07 年报道的  $p^{+}-\pi-n--n^{+}$  和  $p-i-n$  结构紫外光电探测器

2007 年，本实验小组制备了以热生长的  $\text{SiO}_2$  作为减反射膜和钝化层的 4H-SiC 基  $p-i-n$  紫外探测器<sup>[21]</sup>。该探测器的暗电流在 20 V 的偏压下仅为 0.5 pA，其响应度和外量子效率峰值在 270 nm 分别达到了 0.13 A/W 和 61%。

目前，国际上已有几家公司对 SiC 探测器芯片进行封装成管，如美国 Cree 公司和德国 sglux 公司<sup>[22]</sup>等。

### § 1.3 紫外探测器的光电特性随温度变化的研究现状

随着空间科学的发展，航空航天及太空环境监测等要求光电探测器能够在较宽的温度范围内保持良好的性能，而半导体器件的工作性能与温度有很大的关系，不同温度下，半导体材料的吸收系数，载流子浓度，载流子寿命，迁移率等光学、电学参数都会发生变化。例如随着温度的升高载流子运动速度加快，导致暗电流增大，它使输出信噪比变差，将不利于弱光信号的探测，因此研究光电探测器的光电特性随温度变化的特点具有重要的理论和实际意义。

目前，国内外关于 4H-SiC 材料的  $p-i-n$  结构二极管正向特性以及肖特基结构，雪崩结构光电探测器 (APD) 的光电特性随温度变化的研究已有报道。T V Blank 等人对肖特基结构 GaAs，GaP 和 4H-SiC 紫外光电探测器，以及  $p-n$  结构 Si，GaAs 紫外探测器光电转换量子效率的温度特性进行了一系列的研究<sup>[23-25]</sup>。2005 年，T V Blank 等人对肖特基结构 4H-SiC 探测器在 80-400 K 温度范围内光电转换的量子效率进行了研究，发现低温条件下 (78-175 K) 各响应波长的量子效率随温度升高而增大，高温条件下 (大于 300 K)，长波部分 (约大于 247 nm) 光响应又出现二次增



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库